



丸文学術賞 受賞者

武田 俊太郎

東京大学 大学院工学系研究科
准教授

量子テレポーテーション回路の高効率化と ループ型光量子計算機への展開

独自の光方式で日本発・世界初の量子計算機に挑む

研究の背景

本研究は、光を用いた量子コンピュータを飛躍的に高効率化・大規模化する独自の手法を發明および開発したものである。量子コンピュータとは、特定の計算を現代のスーパーコンピュータより高速に実行できる新しい計算原理のコンピュータである。その応用分野は、新薬・機能性材料の設計、最適化、人工知能の性能向上など多岐にわたる。現在、世界各国で超伝導回路・イオン・半導体・光など様々な方式で開発が進められており、どれが「本命」ともいえない状況にある。その中で、光方式の量子コンピュータは、他の方式で必要な冷凍・真空装置が不要で、常温・大気中で動作すること、高速な計算処理が可能であること、さらには光で情報をやり取りする量子インターネットと容易に接続できることなどの利点があり、オールマイティな量子コンピュータの実現が期待できる。一方で、光方式の量子コンピュータには、計算の非効率性や大規模な光回路が必要になることなど、実用化へ向けた課題があった[1]。本研究では、それらの課題を克服する独自の手法を發明および開発した。

研究の成果

我々はまず、光量子コンピュータにおいて計算の機能を担う「量子テレポーテーション回路」を新手法により100倍以上高効率化した[2,3]。さらに、それを用いてどれほど大規模な計算も最小規模の回路で実行できる「ループ型光量子コンピュータ」を發明し[4]、その心臓部の開発にも成功した[5,6]。これらの成果は、光量子コンピュータの飛躍的な高効率化・大規模化を可能とし、その開発に

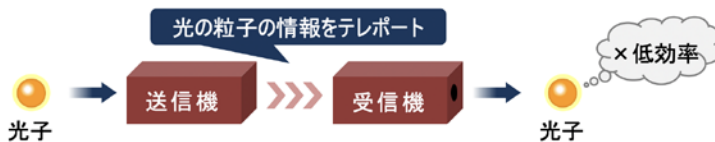
必要なリソースやコストを大幅に減少させるもので、光量子コンピュータにイノベーションをもたらすと期待される。以下、それぞれの成果についてより詳しく述べる。

1. 量子テレポーテーション回路の高効率化

量子テレポーテーションとは、ある量子(ミクロな粒子)が持つ情報を、別の量子へ転写する、一種の「情報通信」である。また、量子テレポーテーションは「計算」にも応用可能であり、量子コンピュータの基本的な計算(加減乗除に相当)を実行する際にも用いられる。従来、光の量子テレポーテーションには、光の粒子性を用いた方式(図1(a))と、光の波動性を用いた方式(図1(b))の2種類の方式があった[1]。しかし、前者は効率が著しく低いこと、後者は転写精度が制限されることが弱点で、実用化への課題となっていた。本研究では、これら2つの方式

図1 量子テレポーテーション

(a) 光の粒子性を用いた量子テレポーテーション回路



(b) 光の波動性を用いた量子テレポーテーション回路



(c) ハイブリッド方式の量子テレポーテーション回路

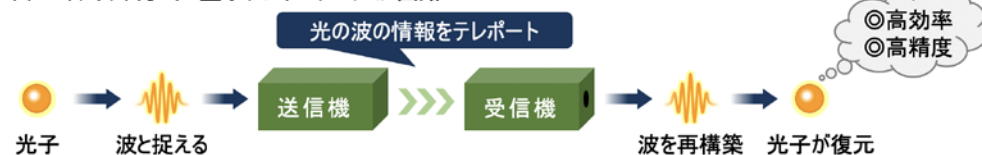


図2 光子量子コンピュータの回路

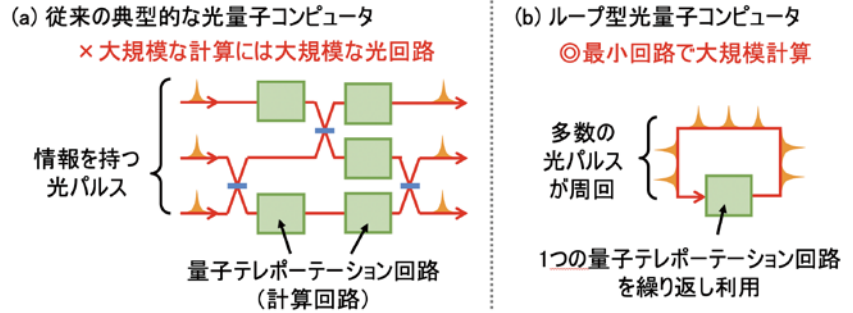
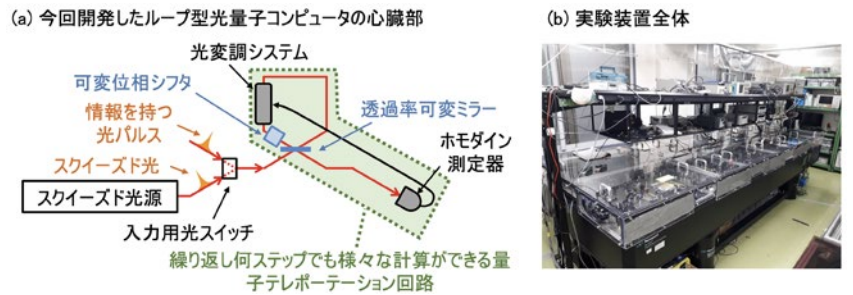


図3 ループ型光子量子コンピュータの心臓部の開発



を組み合わせた新しいハイブリッド方式(図1(c))で、両方式の弱点を一挙に克服し、飛躍的な高性能化を実現した。これは具体的には、情報を持つ光子(光の量子)を一度波と捉え、波の情報を転写することで、結果的に光子の情報を転写するという方式である。本研究では、ハイブリッド方式の量子テレポーテーションを世界で初めて実現し、従来よりも100倍以上高い効率を達成すると同時に、高い転写精度も実現した[2,3]。この成果により、ハイブリッド方式が従来の2方式双方の弱点を同時に補完し、量子テレポーテーション回路を飛躍的に高性能化できることが実証された。

2. ループ型光子量子計算機の発明と開発

我々は2017年に、前述したハイブリッド方式の量子テレポーテーション回路の応用として、どれほど大規模な計算も最小規模の回路で実行できる「ループ型光子量子コンピュータ」のアイデアを発明した[4]。従来、大規模な光子量子コンピュータは、光の進む経路に沿って多数の量子テレポーテーション回路(計算回路)を空間的に並べて何ステップも計算を行うことで実現できると考えられてきた(図2(a))。一方、我々が発明した方式は、光が1つの量子テレポーテーション回路を何度もループする構造を作り、1つの回路を回数無制限で繰り返し用いて何ステップも計算を行うというアイデアである(図2(b))。この方式は、光子量子コンピュータの飛躍的な大規模化を促し、それに必要なリソースやコストを大幅に減少させるものである。このアイデアに基づき、我々は2019年にその一部の機能を開発し、計算に必要な量子もつれを合成する機能を実現した[5]。さらに2021年には、ループ型光子量子コンピュータの心臓

部となる、繰り返し何ステップも様々な計算ができる量子テレポーテーション回路を世界に先駆けて開発した(図3)[6]。今後、この量子テレポーテーション回路を多数の光パルスがループする構造を作れば、様々な計算を無制限に何ステップでも続けられることになり、大規模な計算を最小回路で実行できる「ループ型光子量子コンピュータ」が実現できる。これにより、日本発・世界初の大規模・汎用光子量子コンピュータへの道が開けた。

将来の展望

本研究の成果は、光子量子コンピュータの飛躍的な高効率化・大規模化を可能とし、光子量子コンピュータにイノベーションをもたらすものである。現在、世界最先端の光子量子コンピュータは数百量子ビット程度の小

規模なものであるが、我々の方式では桁違いの大規模化の可能性を秘めており、将来的に日本発・世界初の量子コンピュータへと発展することが期待される。さらに、我々の成果は光子量子コンピュータのみならず、多彩な光子技術、例えば現在の限界を超える大容量通信や超高感度なバイオイメージングなど、通信・計測分野にも革命をもたらし、幅広い応用へ波及効果が及ぶインパクトのある成果といえる。

謝辞

本研究は多くの方々のご支援・ご協力のもとに行われました。学生時代からご指導をいただいている東京大学の古澤明教授およびその研究室の皆様、また2019年に立ち上げた研究室を支えてくれた榎本雄太郎助教および学生、共同研究者の皆様により感謝申し上げます。

References(参考文献)

- [1] S. Takeda, A. Furusawa, APL Photonics 4, 060902 (2019) .
- [2] S. Takeda, T. Mizuta, M. Fuwa, P. van Loock, A. Furusawa, Nature 500, 315 (2013) .
- [3] S. Takeda, M. Fuwa, P. van Loock, A. Furusawa, Physical Review Letters 114, 100501 (2015) .
- [4] S. Takeda, A. Furusawa, Physical Review Letters 119, 120504 (2017) .
- [5] S. Takeda, K. Takase, A. Furusawa, Science Advances 5, eaaw4530 (2019) .
- [6] Y. Enomoto, K. Yonezu, Y. Mitsuhashi, K. Takase, S. Takeda, Science Advances 7, eabj6624 (2021) .